

Teil III

Organisation von Rechensystemen

Überblick

Virtuelle Maschinen

- Semantische Lücke
- Mehrebenenmaschinen
- Softwaremaschinen
- Partielle Interpretation
- Programmunterbrechung
- Nebenläufigkeit
- Virtualisierung
- Zusammenfassung

Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Faustregel: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Quellsprache} \rightarrow \text{höheres} \\ \text{Zielsprache} \rightarrow \text{niedrigeres} \end{array} \right\}$ Abstraktionsniveau

engl. *semantic gap* [13]

The difference between the complex operations performed by high-level constructs and the simple ones provided by computer instruction sets. It was in an attempt to try to close this gap that computer architects designed increasingly complex instruction set computers.

☞ Kluft zwischen gedanklich Gemeintem und sprachlich Geäußertem

Matrix-Matrix Multiplikation

Problemskizze

Multiplikation von zwei 2×2 Matrizen:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}$$

Daraus lässt sich für $C = A \times B$ allgemein ableiten:

$$C_{i,j} = \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj}$$

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Umsetzung in ein Programm (vi multiply.c)

Implementierung in C, $N = 2$

```
typedef int Matrix [N][N];
void multiply (const Matrix a, const Matrix b, Matrix c) {
    unsigned int i, j, k;
    for (i = 0; i < N; i++)
        for (j = 0; j < N; j++) {
            c[i][j] = 0;
            for (k = 0; k < N; k++)
                c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
        }
}
```

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Umwandlung in ein semantisch äquivalentes Programm (gcc -S multiply.c)

_multiply:

```
    pushl %ebp
    movl  %esp,%ebp
    pushl %edi
    pushl %esi
    pushl %ebx
    subl  $12,%esp
    movl  $0, -16(%ebp)
    movl  16(%ebp),%edi
```

L16:

```
    movl  $0,-20(%ebp)
    movl  -16(%ebp),%eax
    movl  -16(%ebp),%ebx
    sall  $3,%eax
    addl  %ebx,%ebx
    movl  %eax,-24(%ebp)
    .align 16
```

L15:

```
    movl  $0, (%edi,%ebx,4)
    movl  -20(%ebp),%edx
    xorl  %esi,%esi
    movl  12(%ebp),%eax
    leal  (%eax,%edx,4),%ecx
    movl  8(%ebp),%eax
    movl  -24(%ebp),%edx
    addl  %eax,%edx
```

L14:

```
    movl  (%ecx),%eax
    incl  %esi
    addl  $8,%ecx
    imull (%edx),%eax
    addl  $4,%edx
    addl  %eax, (%edi,%ebx,4)
```

```
    cmpl  $1,%esi
    jbe  L14
    incl  -20(%ebp)
    incl  %ebx
    cmpl  $1,-20(%ebp)
    jbe  L15
    incl  -16(%ebp)
    cmpl  $1,-16(%ebp)
    jbe  L16
    addl  $12,%esp
    popl  %ebx
    popl  %esi
    popl  %edi
    popl  %ebp
    ret
```

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)


Verschiedenheit zwischen Quell- und Zielsprache

Ebene der Problemskizze  1 Summenformel

- ▶ welches Problem behandelt wird, ist (nahezu) offensichtlich
- ▶ eine semantische Lücke ist eigentlich nicht vorhanden

Ebene der Programmiersprache C  5 Komplexschritte

- ▶ welches Problem behandelt wird, ist (für Experten) noch erkennbar
- ▶ die semantische Lücke ist vergleichsweise klein

Ebene der Assemblersprache (x86)  $43+n$ Maschinenanweisungen

- ▶ welches Problem behandelt wird, ist (eigentlich) nicht erkennbar
- ▶ die semantische Lücke ist vergleichsweise sehr groß

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

Objektmodul — das fast ausführbare Programm

Maschinenkode (x86) in Hex

```
5589E557565383EC0CC745F0000000008B7D10C745EC0000
00008B45F08B5DF0C1E00301DB8945E8908DB42600000000
C7049F000000008B55EC31F68B450C8D0C908B45088B55E8
01C28B014683C1080FAF0283C20401049F83FE0176ECFF45
EC43837DEC0176C8FF45F0837DF00176A283C40C5B5E5F5D
C3
```

Ebene der Maschinsprache (x86)  121 Bytes

- ▶ welches Problem behandelt wird, ist überhaupt nicht mehr erkennbar
- ▶ die semantische Lücke ist (nahezu) unendlich groß

Matrix-Matrix Multiplikation (Forts.)

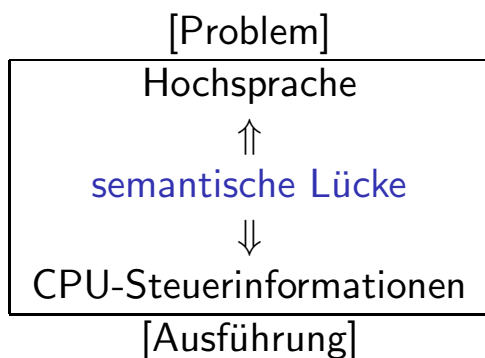
$$C_{i,j} = \sum_k A_{ik} \cdot B_{kj} \stackrel{?}{\iff} 5589E5 \dots 5F5DC3$$

Die Diskrepanz zwischen der vom Menschen skizzierten Problemlösung und dem dazu korrespondierenden, von der Maschine „x86“ ausführbaren Programm, ist beträchtlich.

Abstraktion half, sich auf das Wesentliche konzentrieren zu können

- ▶ eine **virtuelle Maschine** zur Matrixmultiplikation entstand
- ▶ die schrittweise abgebildet wurde auf eine **reale Maschine**

Semantische Lücke schrittweise schließen



Die Ausdehnung der Lücke variiert:

- ▶ bei gleich bleibendem Problem mit der Plattform (dem System)
- ▶ bei gleich bleibender Plattform mit dem Problem (der Anwendung)

Lückenschluss ist ganzheitlich zu sehen

Problemlösungen über **virtuelle Maschinen** auf die reale Maschine abbilden

Hierarchie virtueller Maschinen

Interpretation und Übersetzung

Ebene		
n	virtuelle Maschine M_n mit Maschinsprache S_n	Programme in S_n werden von einem auf einer tieferen Maschine laufenden Interpreter gedeutet oder in Programme tieferer Maschinen übersetzt
\vdots	\vdots	\vdots
2	virtuelle Maschine M_2 mit Maschinsprache S_2	Programme in S_2 werden von einem auf M_1 bzw. M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_1 bzw. S_0 übersetzt
1	virtuelle Maschine M_1 mit Maschinsprache S_1	Programme in S_1 werden von einem auf M_0 laufenden Interpreter gedeutet oder nach S_0 übersetzt
0	reale Maschine M_0 mit Maschinsprache S_0	Programme in S_0 werden direkt von der Hardware ausgeführt

Programme leisten die Abbildung

Kompilierer (engl. *compiler*) und Interpretierer (engl. *interpreter*)

Kom|pi|la|tor *lat.* (Zusammenträger)

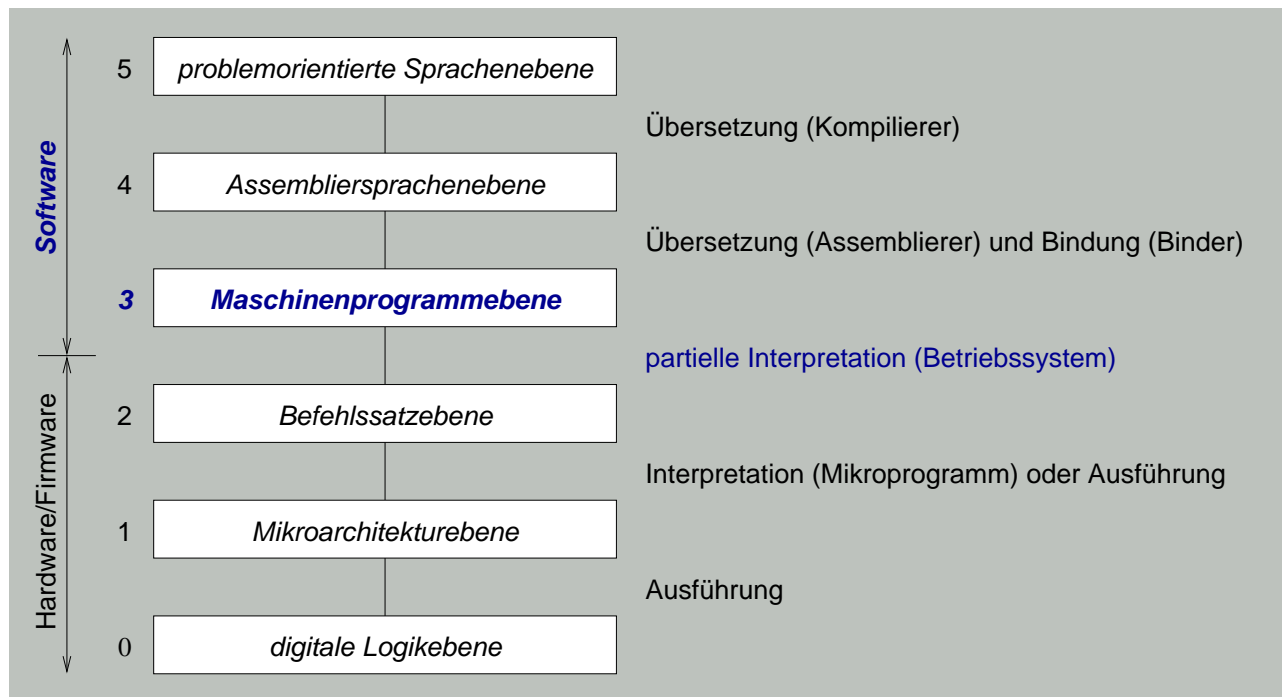
Ein typischerweise in Software realisierter *Prozessor*, der Programme einer bestimmten *Quellsprache* (z.B. C++) in semantisch äquivalente Programme einer bestimmten *Zielsprache* (z.B. C oder Assembler) transformiert.

In|ter|pret *lat.* (Ausleger, Erklärer, Deuter)

Ein in Hard-, Firm- oder Software realisierter *Prozessor*, der Programme einer bestimmten Quellsprache (z.B. Basic, Perl, C, sh(1)) „direkt“ ausführt. Bei *Vorübersetzung* durch einen Kompilierer werden die Programme zunächst in eine für die Interpretation günstigere Repräsentation (z.B. Pascal P-Code, Java Bytecode, x86-Befehle) transformiert.

Hardware/Software Hierarchie

Betriebssystem als Interpret



Elementaroperationen der einzelnen Ebenen

Softwaremaschinen

Problemorientierte Programmiersprachenebene

„Höhere Programmiersprachen“ erlauben die abstrakte und plattformunabhängige Formulierung von Problemlösungen. Programme setzen sich zusammen aus Konstrukten zur Selektion und Iteration, zur Formulierung von Sequenzen, Blockstrukturen, Prozeduren, zur Beschreibung von elementaren und abstrakte Datentypen und (getypten) Operatoren.

Assemblersprachenebene

Pseudobefehle (Assembler/Binder), mnemonisch ausgelegte Maschinenbefehle (ISA) und symbolisch bezeichnete Operanden (Speicheradressen, Register) und Adressierungsarten bilden die Programme (*symbolischer Maschinenkode*).

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Softwaremaschinen

Maschinenprogrammzebene

Legt die Betriebsarten fest, verwaltet die Betriebsmittel des Rechners und steuert bzw. überwacht die Abwicklung von Programmen. *Systemaufrufe* und *Maschinenbefehle* (ISA) bilden die Elementaroperationen der Programme (*binärer Maschinenkode*).

Brennpunkt von SOS_I: **Betriebssysteme** implementieren diese Ebene

- ▶ auf Basis der problemorientierten und Assemblersprachenebenen

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Firm-/Hardwaremaschinen

Befehlssatzebene (engl. *instruction set architecture, ISA*)

Implementiert das *Programmiermodell* der CPU (z.B. CISC, RISC, VLIW). Programme bestehen aus *Mikroanweisungen* oder Konstrukten einer *Hardwarebeschreibungssprache* (z.B. VHDL, SystemC).

Mikroarchitekturebene

Beschreibt den Aufbau der Operations-/Steuerwerke, der Zwischenspeicher und die Befehlsverarbeitung. Programme bestehen aus Konstrukten einer *Hardwarebeschreibungssprache* (z.B. VHDL, SystemC).

Elementaroperationen der einzelnen Ebenen (Forts.)

Hardwaremaschinen

Digitale Logikebene

Bildet auf Basis von Transistoren, Gattern, Schaltnetzen und Schaltwerken die wirkliche Hardware des Rechners. Programme bestehen aus Elementen der *Boolschen Algebra*.

- ▶ maximale Flexibilität
- ▶ minimale Benutzerfreundlichkeit
- ▶ maximale Distanz von sehr vielen Problemdomänen

Abstraktionsniveau vs. Semantische Lücke

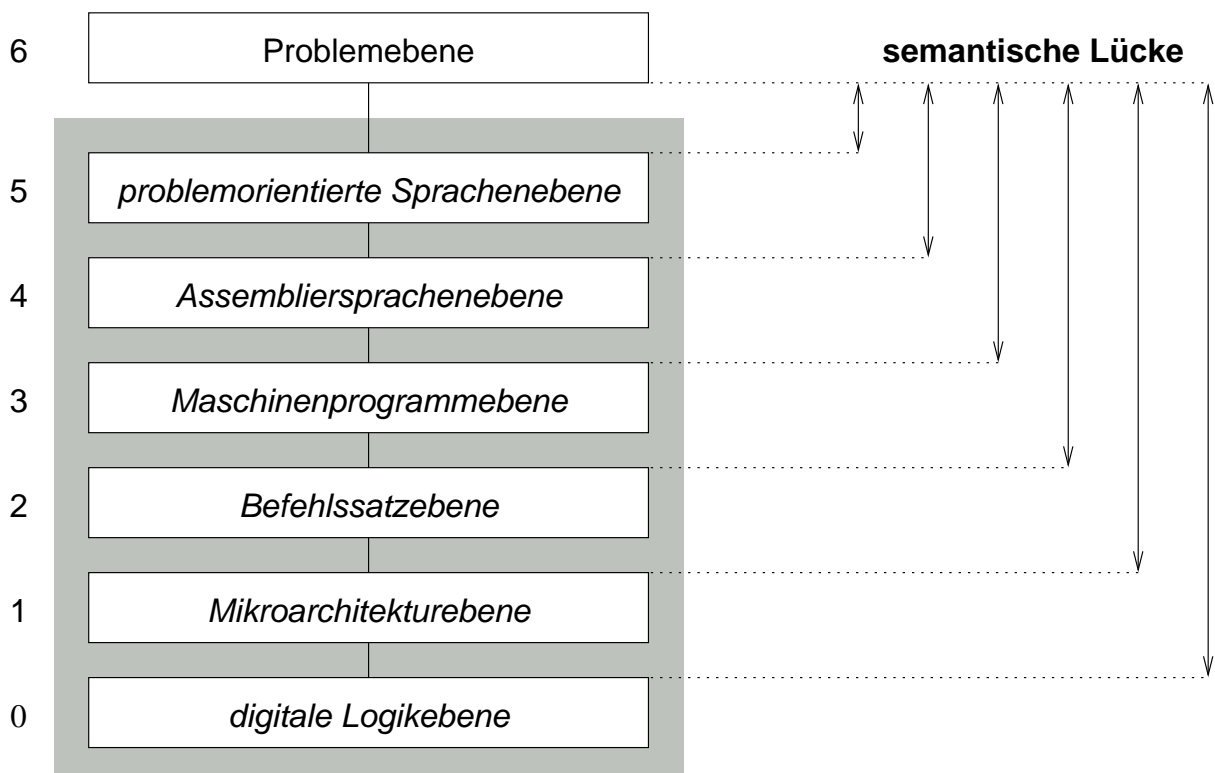


Abbildung durch Übersetzung

Ebene₅ \mapsto Ebene₄: Kompilierung

Ebene₅-Befehle „1:N“ in Ebene₄-Befehle übersetzen

- ▶ ein Hochsprachenbefehl ist eine Folge von Assemblersprachenbefehlen
 - ☞ *semantisch äquivalente* Befehlsfolge
- ▶ im Zuge der Transformation ggf. Optimierungsstufen durchlaufen

Ebene₄ \mapsto Ebene₃: Assemblierung und Binden

Ebene₄-Befehle („Mnemoniks“) „1:1“ in Ebene₃-Befehle übersetzen

- ▶ ein **Quellmodul** in ein **Objektmodul** umwandeln
- ▶ mit **Bibliotheken** zum Maschinenprogramm zusammenbinden

Abbildung durch Interpretation

Ebene₃ \mapsto Ebene₂: Teilinterpretation (auch *partielle Interpretation*)

Ebene₃-Befehle als Folgen von Ebene₂-Befehlen ausführen

- ▶ **Systemaufrufe** aus den Ebene₃-Befehlstrom „herausfiltern“
- ▶ ein Ebene₃-Befehl aktiviert ein Ebene₂-Programm

Ebene₂ \mapsto Ebene₁: Interpretation

Ebene₂-Befehle als Folgen von Ebene₁-Befehlen ausführen

- ▶ **Abruf- und Ausführungszyklus** (engl. *fetch-execute-cycle*) der CPU
- ▶ ein Ebene₂-Befehl löst Ebene₁-Steueranweisungen aus

Prozessoren implementieren die Abbildungen

Ebene₅ ➡ **Kompilierer**

- ▶ Interpretation von Konstrukten/Anweisungen einer „Hochsprache“

Ebene₄ ➡ **Assemblierer** und **Binder**

- ▶ Interpretation von Anweisungen einer Assemblersprache

Ebene₃ ➡ **Betriebssystem**

- ▶ Interpretation von Systemaufrufen
- ▶ Ausführung von Ebene₃-Programmen (durch Teilinterpretation)

Ebene₂ ➡ **Zentraleinheit** (CPU)

- ▶ Interpretation von Instruktionen (an die ALU, FPU, MMU, ...)
- ▶ Ausführung von Ebene₂-Programmen

Programm der problemorientierten Sprachenebene

Echo

```
myecho.c
main () {
    char c;
    while (write(1, &c, read(0, &c, 1)) != -1) {}
}
```

Die Funktion `read(2)` überträgt ein Zeichen von Standardeingabe (0) an die Speicheradresse `&c`, deren Inhalt anschließend mit der Funktion `write(2)` zur Standardausgabe (1) gesendet wird. Die Schleife terminiert durch Unterbrechung, unter UNIX z.B. nach Eingabe von `^C`.

Programm der Assemblersprachenebene

myecho.s (generiert mit „gcc -O6 -S myecho.c“)

main () {...

```
main:
    pushl %ebp
    movl  %esp,%ebp
    pushl %esi
    pushl %ebx
    subl  $16,%esp
    leal  -9(%ebp),%ebx
    andl  $-16,%esp
    movl  %ebx,%esi
    .align 16
```

while (...) {}

```
.L2:
    movl  %esi,4(%esp)
    movl  $1,%edx
    movl  %ebx,%esi
    movl  %edx,8(%esp)
    movl  $0,(%esp)
    call  read
    movl  %eax,8(%esp)
    movl  %ebx,4(%esp)
    movl  $1,(%esp)
    call  write
    incl  %eax
    jne  .L2
```

... }

```
    leal  -8(%ebp),%esp
    popl  %ebx
    popl  %esi
    popl  %ebp
    ret
```

Programm der Assemblersprachenebene (Forts.)

Auszüge aus der C-Bibliothek (libc.a) des Kompilers (gcc(1))

read:

```
    push %ebx
    movl 16(%esp),%edx
    movl 12(%esp),%ecx
    movl 8(%esp),%ebx
    mov  $3,%eax
    int  $0x80
    pop  %ebx
    cmp  $-4095,%eax
    jae  __syscall_error
    ret
```

__syscall_error:

```
    neg %eax
    mov %eax,errno
    mov $-1,%eax
    ret

    .comm errno,16
```

write:

```
    push %ebx
    movl 16(%esp),%edx
    movl 12(%esp),%ecx
    movl 8(%esp),%ebx
    mov  $4,%eax}
    int  $0x80
    pop  %ebx
    cmp  $-4095,%eax
    jae  __syscall_error
    ret
```

☞ Der **Binder** (ld(1)) wird diese Funktionen später hinzufügen

☞ **Teilinterpretation**: **int \$0x80** schaltet um von Ebene₂ zu Ebene₃

Programm der Assemblersprachenebene (Forts.)

Auszüge aus Linux (kernel-source-2.4.20/arch/i386/kernel/entry.S)

Sichern

```
system_call:
    pushl %eax
    cld
    pushl %es
    pushl %ds
    pushl %eax
    pushl %ebp
    pushl %edi
    pushl %esi
    pushl %edx
    pushl %ecx
    pushl %ebx
    ...
```

Behandeln

```
    ...
    cmpl $(NR_syscalls),%eax
    jae  badsys
    call *sys_call_table(,%eax,4)
    movl %eax,24(%esp)
ret_from_sys_call:
    ...
badsys:
    movl $-ENOSYS,24(%esp)
    jmp  ret_from_sys_call
```

Wiederherstellen

```
    ...
    popl %ebx
    popl %ecx
    popl %edx
    popl %esi
    popl %edi
    popl %ebp
    popl %eax
    popl %ds
    popl %es
    addl $4,%esp
    iret
```

Programm der problemorientierten Sprachenebene (Forts.)

Auszüge aus Linux (kernel-source-2.4.20/fs/read_write.c)

Systemaufrufe implementierende Programme

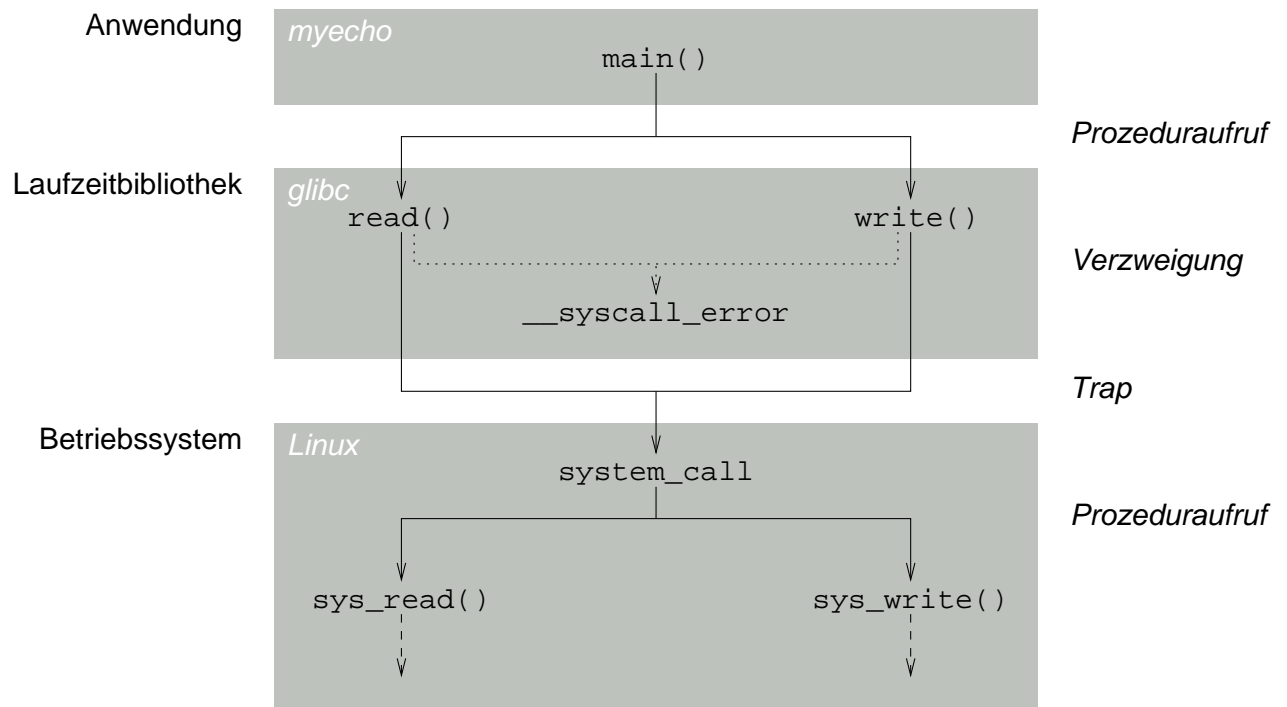
```
asmlinkage ssize_t sys_read(unsigned int fd, char * buf, size_t count) {
    ssize_t ret;
    struct file * file;

    ret = -EBADF;
    file = fget(fd);
    if (file) {
        ...
    }
    return ret;
}

asmlinkage ssize_t sys_write ...
```

Softwaresystem „myecho“

Aufrufhierarchie



Systemaufrufchnittstelle (engl. *system call interface*)

UNIX Programmers Manual (UPM), Lektion 2 — man(2)

```

read:
  push %ebx
  movl 16(%esp),%edx
  movl 12(%esp),%ecx
  movl 8(%esp),%ebx
  mov $3,%eax
  int $0x80
  pop %ebx
  cmp $-4095,%eax
  jae __syscall_error
  ret
  
```

Aufrufstümpfe verbergen die technische Auslegung der Interaktion zwischen Anwendungsprogramm und Betriebssystem

- ▶ „nach außen“ erscheint ein Systemaufruf als normaler **Prozeduraufruf**
- ▶ „nach innen“ setzt ein Systemaufruf eine (synchrone) **Programmunterbrechung** ab

Systemaufrufe sind spezielle „Prozedurfernaufufe“, die ggf. bestehende Schutzdomänen in kontrollierter Weise überwinden müssen

- ▶ getrennte Adressräume für Anwendungsprogramm und Betriebssystem
- ▶ Ein-/Ausgabeparameter in Registern übergeben, „Trap“ auslösen

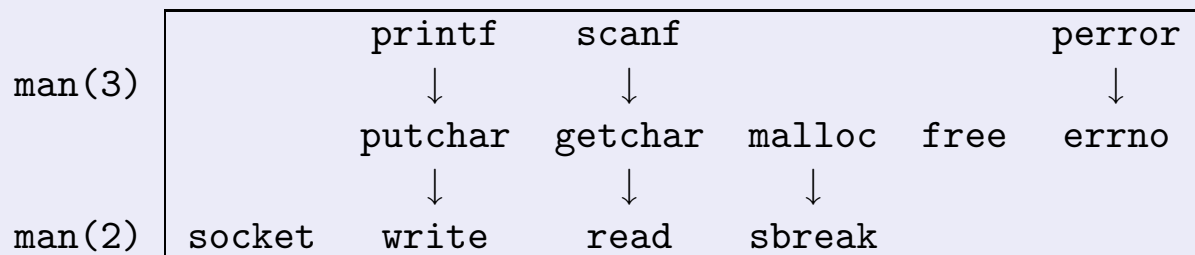
Laufzeitumgebung (engl. *runtime environment*)

UNIX *Programmers Manual* (UPM), Lektion 3 — `man(3)`

Programmbausteine in Form eines zur Laufzeit zur Verfügung gestellten universellen Satzes von Funktionen und Variablen

- ▶ Lesen/Schreiben von Dateien, Ein-/Ausgabegeräte steuern
- ▶ Daten über Netzwerke transportieren oder verwalten
- ▶ formatierte Ein-/Ausgabe, ...

Laufzeitbibliothek von C unter UNIX (Auszug)



Organisation von Maschinenprogrammen

„Die Drei von der Tankstelle“

Anwendungsroutinen (des Rechners)

- ▶ bei C/C++ die Funktion `main()` und anderes Selbstgebautes
- ▶ setzen u.a. Betriebssystem- oder Laufzeitsystemaufrufe ab

Laufzeitsystem (des Kompilierers/Betriebssystems)

- ▶ bei C z.B. die Bibliotheksfunktionen `printf(3)` und `malloc(3)`
- ▶ setzt Betriebssystem- oder (andere) Laufzeitsystemaufrufe ab

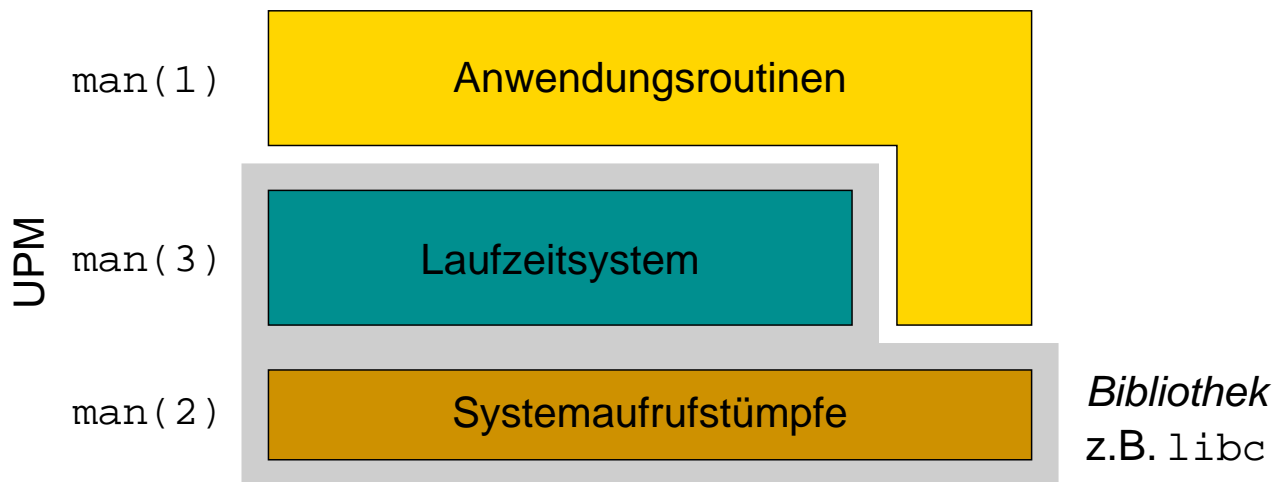
Systemaufrufstümpfe (des Betriebssystems)

- ▶ bei UNIX z.B. die Bibliotheksfunktionen `write(2)` und `sbreak(2)`
- ▶ setzen synchrone Programmunterbrechungen (d.h. Traps) ab

☞ bilden zusammengebunden ein **Anwendungsprogramm**

Organisation von Maschinenprogrammen (Forts.)

Software(grob)struktur innerhalb eines Benutzeradressraums

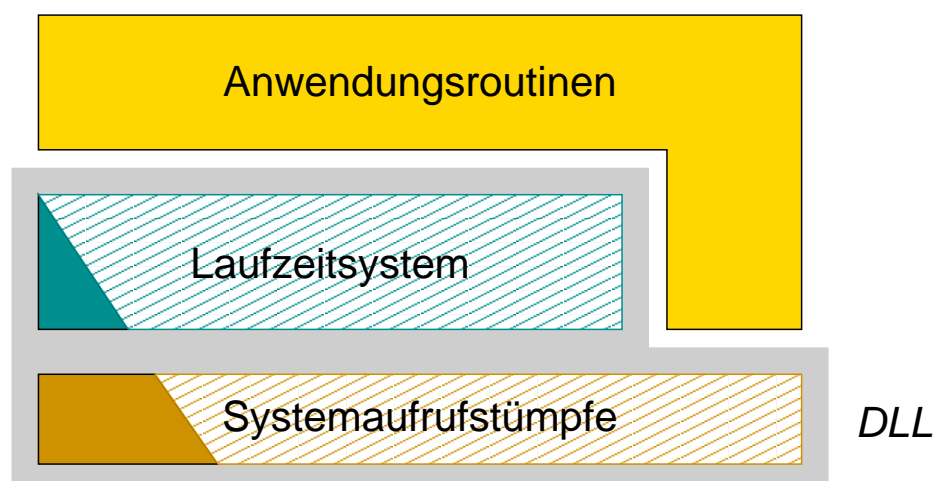


Modell für eine **statische Bibliothek** (gcc bzw. ld -static ...)

- ▶ auch Dienstprogramme (z.B. ls(1)) sind so repräsentiert
- ▶ der Aufbau spiegelt jedoch nur die **logische Struktur** wieder
- ▶ dynamisches Binden von Bibliotheken liefert eine andere Sicht...

Organisation von Maschinenprogrammen (Forts.)

Dynamische Bibliothek (engl. *shared library*, UNIX; *dynamic link library* (DLL), Windows)



Bibliotheksfunktionen erst bei Bedarf (vom Betriebssystem) einbinden

- ▶ z.B. beim erstmaligen Aufruf („*trap on use*“, Multics [14])
- ▶ enorme Speicherplatzersparnis — im Hintergrundspeicher (Platte) !!!
- ▶ ein **bindender Lader** ist Bestandteil des Betriebssystems

Zusammenspiel von Ebene₂ und Ebene₃

Elementaroperationen der Maschinenprogrammebene

Maschinenprogramme umfassen zwei Sorten von Befehlen:

- 1. Aufrufe an das Betriebssystem (Ebene₃)
 - ▶ explizit als **Systemaufruf** (engl. *system call*) kodiert
 - ▶ implizit als **Programmunterbrechung** (engl. *trap, interrupt*) ausgelöst
- 2. Anweisungen an die CPU (Ebene₂)

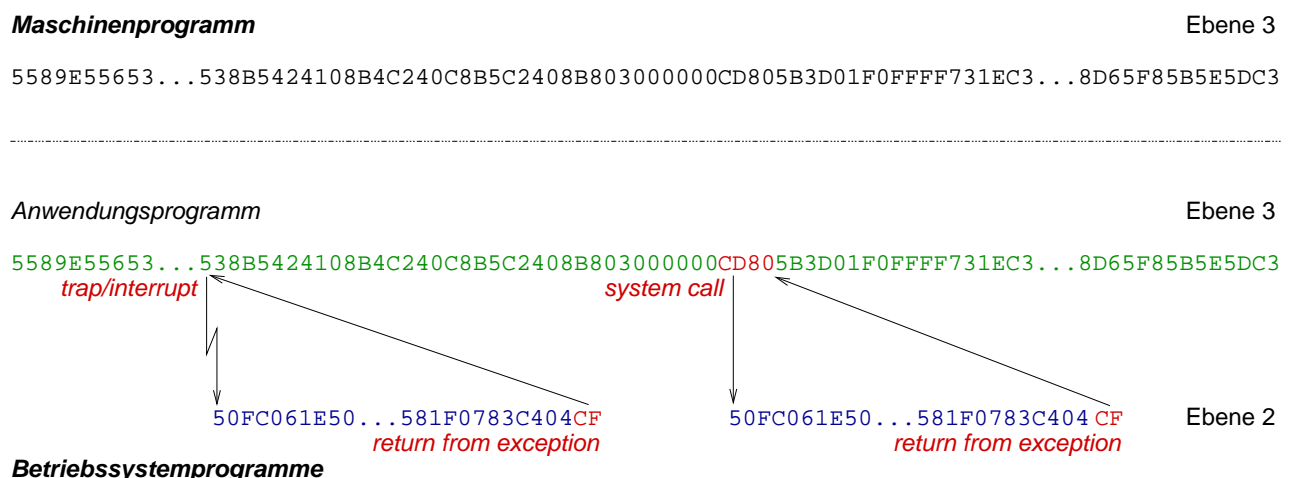
Ausführende Instanz ist immer die CPU, die nur Ebene₂-Befehle kennt

- ▶ Ebene₃-Befehle { werden „wahrgenommen“, nicht ausgeführt
 signalisieren eine **Ausnahme** (engl. *exception*)

Das Betriebssystem fängt Ebene₃-Befehle ab, behandelt Ausnahmen

Zusammenspiel von Ebene₂ und Ebene₃ (Forts.)

Programmunterbrechungen bewirken partielle Interpretation



Programme der Maschinenprogrammzebene

Hybride Ebene

Ebene₃-Befehle. . .

- ▶ sind „normale“ Befehle der Ebene₂, die die CPU ausführt
- ▶ sind „ausnahmebedingte“ Befehle, die das Betriebssystem ausführt

. . . implementieren z.B. Adressräume, Dateien, Prozesse

- ▶ Interpret dieser zusätzlichen Befehle ist das Betriebssystem

Betriebssysteme werden aktiviert. . .

- ▶ im Falle eines Systemaufrufs (CD80), programmiert
- ▶ im Falle von Ausnahmesituationen, nicht programmiert

. . . und deaktivieren sich immer selbst, programmiert (CF)

Unterbrechungsarten und Ausnahmesituationen

Zwei Kategorien von Ausnahmesituationen werden unterschieden:

1. die „Falle“ (engl. *trap*)
2. die „Unterbrechung“ (engl. *interrupt*)

Unterschiede ergeben sich hinsichtlich. . .

- ▶ Quelle
- ▶ Synchronität
- ▶ Vorhersagbarkeit
- ▶ Reproduzierbarkeit

Behandlung ist zwingend und grundsätzlich prozessorabhängig